

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

NÁVRH MIKOROBOTŮ - NOSNÁ SESTAVA (KŘÍDLO MIKOROBOTU)

DESIGN OF MICROROBOTS –WING SET

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Mikuláš Konečný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Simeon Simeonov, CSc.

BRNO 2021

Zadaní bakalářské práce

Ústav: Ústav automatizace a informatiky

Student: **Mikuláš Konečný**

Studijní program: Strojírenství

Studijní obor: Základy strojního inženýrství

Vedoucí práce: **doc. Ing. Simeon Simeonov, CSc.**

Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

1. Návrh mikrorobotů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh a konstrukce mikrorobotů, které jsou inspirovány přírodou je poměrně nový přístup v robotice. Probíhá aktuální vývoj robotických komponentů, jako jsou umělé svaly, čidla, křídla, apod. Tyto komponenty jsou použity na vývoj prototypů subsystému, jako jsou robotické nohy, robotická křídla, apod. a potom jsou integrovány do komplexních robotických zařízení.

Cíle bakalářské práce:

2. Analýza problému a literární rešerše.
3. Vytvoření fyzikálních modelů základních elementů mikrorobotů.
4. Praktická aplikace elementů létajícího mikrorobotu se zaměřením na nosnou sestavu (křídlo mikrorobotu).

Pozn. Bakalářská práce je vhodná pro více studentů, pracujících v kolektivu.

Seznam doporučené literatury:

www

Yves Bellouard, Microrobotics: Methods and Applications, ISBN-10: 142006195X, CRC Press (12 Nov 2009).

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce obsahuje stručnou rešerši týkající se metod, systémů a různých komponent používaných v praxi při návrhu a výrobě mikrorobotů. Po této části následuje samotný návrh a výroba křídel a pohybového ústrojí pro zvětšený a zjednodušený model létajícího mikrorobota inspirovaného žijícími zástupci z říše hmyzu. Na závěr jsou stručně rozebrány metody potencionálního řízení a ovládání.

ABSTRACT

The bachelor thesis tries to briefly describe research of methods, systems and diverse components practically used in the design and production of microrobots. The following part of the thesis is based upon a design and fabrication an enlarged and simplified model of wings and flight apparatus of a flying microrobot inspired in the world of living insect. The last part consists of description of potential methods of control and piloting.

KLÍČOVÁ SLOVA

Mikrorobot, zjednodušený model, inspirace hmyzem, křídla a pohybové ústrojí mouchy

KEYWORDS

Microrobot, simplified model, insect inspired, wings and flying apparatus of a fly

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KONEČNÝ, Mikuláš. *Návrh mikrorobotů - nosná sestava (křídlo mikrorobotu)* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132023>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Simeon Simeonov.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji panu doc. Ing. Simeonovi, CSc a své sestře za pomoc při psaní bakalářské práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Simeona Simeonova, CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu literatury.

V Brně dne 22. 5. 2021

.....

Mikuláš Konečný

OBSAH

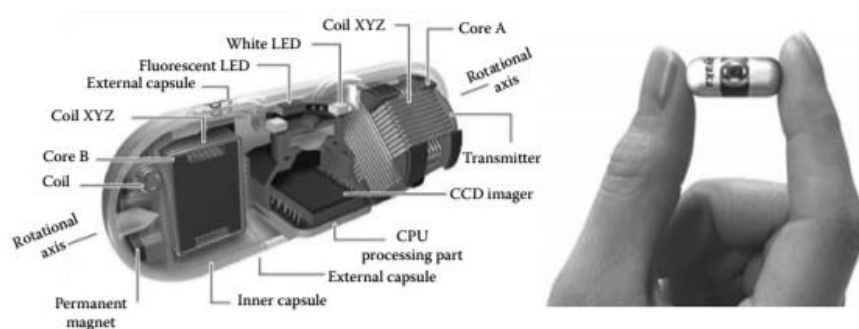
| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | ÚVOD..... | 15 |
| 2 | PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ | 17 |
| 2.1 | Důsledky zmenšování rozměrů | 17 |
| 2.1.1 | Změny plochy a objemu | 17 |
| 2.1.2 | Změny působení sil..... | 17 |
| 2.2 | Zdroje pohybu..... | 18 |
| 2.2.1 | Převodové mechanismy | 19 |
| 2.2.2 | Aktuátory využívající tvarovou paměť | 19 |
| 2.2.3 | Aktuátory využívající teplotní roztažnosti | 20 |
| 2.2.4 | Piezoelektrické aktuátory | 21 |
| 2.3 | Senzorika a řízení | 22 |
| 2.3.1 | Rojová inteligence | 22 |
| 3 | NÁVRH KŘÍDEL A JEJICH POHYBOVÉHO ÚSTROJÍ | 25 |
| 3.1 | Návrh křídél..... | 25 |
| 3.1.1 | Tvar křídél | 25 |
| 3.1.2 | Materiál křídél | 27 |
| 3.2 | Návrh Pohybového ústrojí | 28 |
| 3.2.1 | Výběr akčního členu | 28 |
| 3.2.2 | Kinematický mechanismus..... | 29 |
| 3.2.3 | Možnosti řízení pohybu | 31 |
| 4 | ZHODNOCENÍ A DISKUZE..... | 37 |
| 5 | ZÁVĚR | 39 |
| 6 | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY..... | 41 |

1 ÚVOD

Snaha zmenšovat mechanické a elektronické součástky a jejich systémy za účelem snížení objemu a spotřeby materiálu, přesnějšího měření nebo také rychlejší odezvy dala vzniknout několika oborům, které se zabývají problémy vznikajícími při práci s miniaturními tělesy o velikostech menších než několik milimetrů. Jedním z těchto oborů je mikrorobotika. Její hlavní disciplínou je návrh systémů schopných fyzické interakce s jinými objekty, jejichž rozměry se pohybují od milimetrů po mikrometry. Mikrorobot není tedy jen „malý“ robot, ale jakýkoliv stroj schopný přesně pracovat ve výše uvedeném měřítku (například polohovadlo AFM mikroskopů).

Problémů, které v důsledku zmenšování rozměrů vznikají, je celá řada. Jedná se o potíže s výrobou malých mechanických dílů nebo elektronických součástek a také o jiné rozdělení poměrů působících sil na mikro díly. Významně klesají účinky gravitačních sil a momentů setrvačnosti, ale na druhou stranu výrazně rostou kontaktní síly působící na malé vzdálenosti. Při návrhu strojů a mechanismů v makrosvětě jsou účinky těchto sil zanedbatelné a při řešení silového působení se vůbec neuvažují. V mikrosvětě ale hrají velmi významnou roli, jelikož zabraňují, nebo výrazně omezují, použití mnoha běžných mechanismů používaných ve světě běžných rozměrů. Mezi ty nejzákladnější patří kuličková a kluzná ložiska, ozubení a následně i většina běžných převodovek, nebo použití běžných rotačních motorů jako zdrojů pohybu. Další významné rozdíly jsou pozorovány při přenosu tepla, míchání kapalin a působení elektrického a magnetického pole.

Využití mikrorobotů je ale velmi široké a se zlepšující se technologií a způsobem výroby se stávají důležitým prvkem ve stále více odvětvích. Jedním z hlavních oborů, kde nacházejí uplatnění je měření a výroba velmi přesných a malých součástí pomocí různých laserů a optických soustav vyžadující přesné řízení a umístění. Dalším oborem, který se snaží potenciálu mikrorobotů využít, je lékařství. Vývoj právě v tomto odvětví již nějakou dobu trvá a několik zařízení už bylo vyrobeno a úspěšně použito. Jedná se o mikroroboty různých tvarů sloužících k různým účelům – například mikrokapsle mapující oblasti žaludku a střev pomocí otočné kamery (Obr. 1), nebo roboti vypouštění přímo do krevního oběhu pacientů dopravující látky do přímo určených míst – díky čemuž představují tyto systémy velmi efektivní způsob léčby, nebo její podpory.



Obr. 1: Kapsle mapující oblast žaludku a střev [1]

Samostatnou skupinou jsou mikroroboti schopní pohybu za pomoci vlastního pohybového ústrojí a základního řízení umožněného senzory a řídicí jednotkou. Návrhu a využití takovýchto robotů bude věnována převážná část této práce, která se zaměří zejména na roboty schopné letu. Inspirace živočišnou říší při návrhu jednotlivých částí samovolně se pohybujících mikrorobotů je relativně nový přístup, jenž se snaží o integraci již existujících mechanismů a způsobů pohybu využívaných žijícími tvory všude okolo nás. Hlavní skupinou organismů, od kterých čerpá inspiraci pro létající mikroroboty, je samozřejmě hmyz. Obrovská různorodost a počet druhů patřících do hmyzí říše poskytuje celou knihovnu nápadů, ze které můžeme při návrhu vybírat a jednotlivé části kombinovat za účelem co nejlepší funkce, a to nejen z hlediska svalů a jejich pohybu, ale i z hlediska nervových systémů zajišťujících koordinaci, a řízení. Tento přístup je mi velmi blízký a zaujal mě hlavně proto, že propojuje technologii se studiem biologických organismů, jež jsou samy o sobě fascinující. Mechanismy z živočišné říše pak využívá k řešení některých problémů při návrhu a konstrukci robotů, případně se problémům snaží rovnou předcházet, a dále také dané mechanismy aplikuje při samotném designu systémů a jejich ovládání.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Důsledky zmenšování rozměrů

Zmenšení rozměrů na úroveň mikrosvěta má velmi významný vliv na rozdělení poměru sil působících na tělesa – povrchové síly, zanedbatelné na úrovni velkých rozměrů, hrají ve světě mikrorobotů důležitou roli. Zmenšení velikosti má také vliv na přestup a přenos tepla a na hydrodynamické vlastnosti kapalin.

Vhodným aparátem pro ilustraci změn poměrů působících sil je zavedení tzv. měřítkového faktoru. Jedná se o číslo, kterým násobíme rozměry zkoumaného objektu. Pokud číslem k vynásobíme geometrii objektu dostaneme:

$$(k \cdot a_0, k \cdot a_1, \dots, k \cdot a_n) \rightarrow f(k \cdot a_0, k \cdot a_1, \dots, k \cdot a_n) = k^s \cdot y \quad (1)$$

Při čemž a_i jsou nezávislé rozměry tělesa (ve 3D jsou to rozměry v x, y, z osách).

Pak dle ustálené konvence píšeme, že došlo ke změně sledované vlastnosti vlivem zmenšení rozměrů o měřítkový faktor L^s . Takto lze snadno zjistit, jak se vlivy různých sil mění.

2.1.1 Změny plochy a objemu

Pomocí jednoduchých integrálů jsme schopni zjistit, jaký měřítkový faktor se uplatňuje při zmenšování plochy a objemu částí mikrorobotů. Pro povrch je to:

$$\iint_{\Omega} dS = \iint_{\Omega} dx dy \rightarrow \iint_{k\Omega} dS = \iint_{k\Omega} d(kx)d(ky) = k^2 \iint_{\Omega} dx dy \quad (2)$$

Dle očekávání pak vyjde, že rozměry povrchu se mění s druhou mocninou, tedy L^2 . Stejným způsobem můžeme odvodit měřítkový faktor pro objem, kde dostaneme L^3 .

2.1.2 Změny působení sil

Pomocí definic různých sil působících na těleso můžeme získat měřítkové faktory pro všechny síly, které nás zajímají. Velmi důležité však je brát v potaz podmínky, pro které jsou rovnice, z nichž vycházíme platné, a zda jsou tyto podmínky pro mikro rozměry splněny. Níže jsou uvedeny měřítkové faktory příslušných vlastností (Tab. 1), z nichž je patrné, že například

moment setrvačnosti klesá se čtvrtou mocninou a spolu s gravitační silou klesající se třetí mocninou se stávají méně významnými silami.

Tab. 1: Měřítkové faktory [1]

| Vlastnost | Měřítkový faktor |
|---------------------|--------------------|
| Gravitační síla | L^3 |
| Moment setrvačnosti | L^4 |
| Vlastní frekvence | $L^{-\frac{3}{2}}$ |
| Elektrický odpor | L^{-1} |
| Kapacita | L^1 |
| Indukčnost | L^5 |

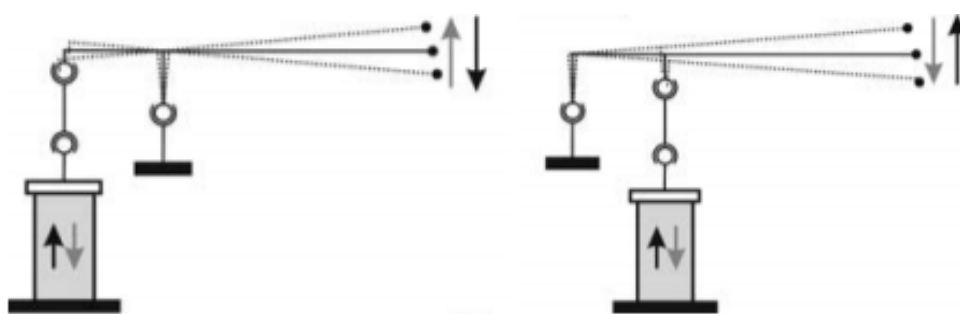
Znalost poměrů sil nám umožňuje správně rozhodnout, kterými silami je nutné se zabývat a které je možné zanedbat. V oblasti výroby létajících mikrorobotů je tohle velmi důležité, protože i přes veškeré simulační programy jsou stále hlavními zdroji informací pokusy a analýza pohybu prototypů, při jejichž návrhu jsou často právě ty méně významné síly zanedbávány.

2.2 Zdroje pohybu

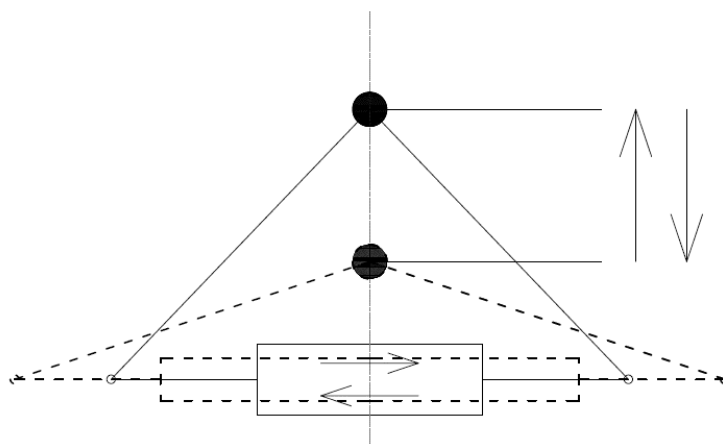
Pro správné vykonávání předem stanovené funkce robota je nezbytně nutný řízený pohyb. K dosažení tohoto pohybu jsou používána zařízení měnící elektrickou, tepelnou, potenciální nebo jinou formu energie na mechanickou. Takových akčních členů neboli aktuátorů použitelných jako zdroje pohybu mikrorobotů je mnoho, ale výrazně se liší od těch používaných ve velkých systémech. Použití „klasických“ AC/DC motorů pro rozpohybování mikrokomponeutů naráží na celou řadu problémů. Řada z nich je spojena s rozdílným působením sil, další vyplývají z omezených možností manipulace, výroby a připojování jednotlivých součástí. V praxi nejvíce používané aktuátory využívají nejčastěji energie naakumulované v jeho krystalické mřížce. Výrazným nedostatkem akčních členů fungujících na tomto principu je velmi malý zdvih. Ten, pokud je to nutné, je potřeba upravit pomocí převodových mechanismů.

2.2.1 Převodové mechanismy

Požadovaný pohyb na výstupu robota je dosažen pomocí kinematických mechanismů. Ty neřídí jen směr pohybu, ale velmi často také fungují jako „převodovky“, když je požadován větší, nebo jiný pohyb, než jakého je použitý aktuátor schopen. Základním mechanismem schopným změnit výšku zdvihu je pákový mechanismus (Obr. 2). Tento mění translační pohyb na rotační a používá se ve dvou variantách, a to pro pohyb výstupu ve fázi s motorem, nebo ve fázi opačné. Pokud je rotační výstup nevhodný, připadá v úvahu trojúhelníkový mechanismus ponechávající translační pohyb vstupního aktuátoru (Obr. 3).



Obr. 2: Pákový mechanismus [1]

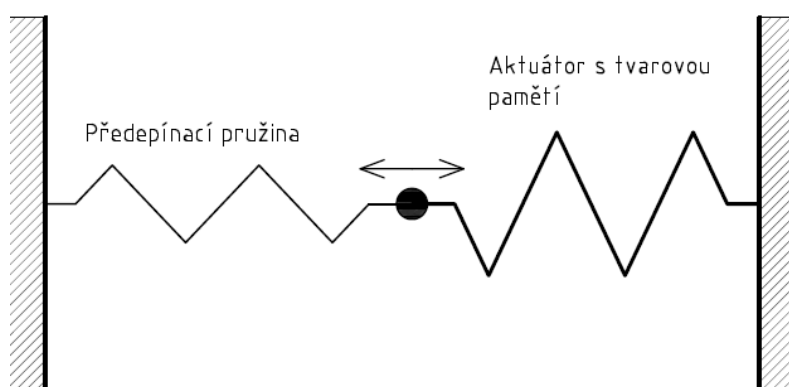


Obr. 3: Trojúhelníkový mechanismus

2.2.2 Aktuátory využívající tvarovou paměť

Plasticky deformovaný materiál s tvarovou pamětí lze zahřátím nad určitou teplotu vrátit do původního tvaru, jaký měl před deformováním. Zahřátím dochází ke změně fáze martenzitické na austenitickou. Aby taková změna mohla proběhnout, musí být materiál polymorfní – to

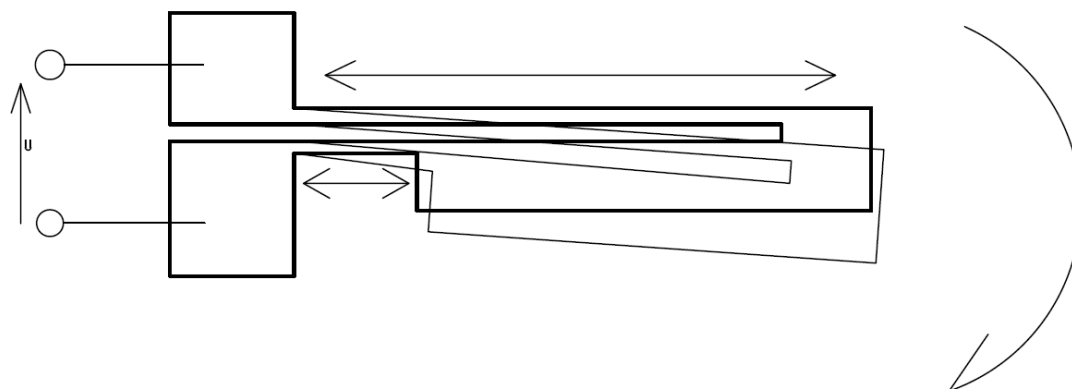
znamená, že u něj může proběhnout v tuhém stavu změna krystalické struktury (nejpoužívanější materiál s tvarovou pamětí je slitina niklu a titanu označována Ni-Ti a nazývána nitinol). Aktuátory využívající tuto technologii jsou vyráběny tak, aby měly velký elektrický odpor a jejich zahřívání tak mohlo být prováděno jednoduchým průchodem proudu. To však nestačí, jelikož takovýmto způsobem jsem schopni dosáhnout pohybu jen jedním směrem, tedy vrátit tvar deformovanému tělesu, ale už ne ho zpátky deformovat. Nedosáhneme tedy opakovatelného pohybu, proto je nutné použít člen, který je schopný materiál s tvarovou pamětí opakovaně deformovat. Nejjednodušším řešením je využití pružiny a následné předeptnutí (Obr. 4). Místo pružiny je možné použít závaží a gravitační zrychlení. Další možností je aplikování dvou či více členů z materiálu s tvarovou pamětí, které se deformují navzájem. Tím je možné dosáhnout velké variability v rámci výstupního pohybu akčního členu.



Obr. 4: Předeptnutí pomocí pružiny

2.2.3 Aktuátory využívající teplotní roztažnosti

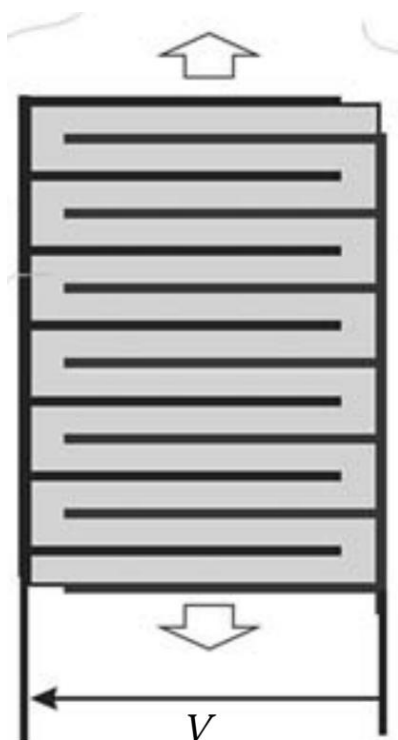
Spojení dvou materiálů s různou teplotní roztažností může také velmi spolehlivě fungovat jako zdroj pohybu. Klasickým příkladem jsou bimetalové pásy v teploměrech. Při snaze využít této metody pro pohon mikrorobotů však narážíme na problém výroby a téměř nemožné zahřívání malých součástí na přesném místě. Velmi účinné a spolehlivé se ukázaly být aktuátory kombinující dva materiály nejen s různou teplotní roztažností, ale i s rozdílným elektrickým odporem, což umožňuje zahřát jen ta místa, která jsou zapotřebí (Obr. 5). Vyrábí se podobně jako elektronické součástky postupným nanášením vrstev určitého materiálu.



Obr. 5: Aktuátor zahříváný pomocí elektrického proudu

2.2.4 Piezoelektrické aktuátory

Piezoelektrické akční členy využívají materiály s krystalickou mřížkou, na které vzniká elektrické napětí, když na ni působí vnější síly. Stejně to funguje i obráceně, po přivedení elektrického napětí na nějakou z os piezoelektrické součástky tak můžeme dosáhnout malé deformace. Piezo-aktuátory musí být pro zajištění své funkce připojeny k napětí přibližně $0,5\text{--}1\text{ kV/mm}$ při teplotě blízké Curieovu bodu, kdy dojde k natočení pólů krystalů stejným směrem. To však s sebou přináší omezení při provozu, jelikož hrozí tzv. přepólování. To může nastat, pokud aktuátor provozujeme při příliš vysoké teplotě, nebo pokud použijeme příliš vysoké napětí. Deformace piezokrystalů jsou však příliš malé (přibližně $3,75 \cdot 10^{-10}\text{ m/V}$ [1]). Z důvodu hrozícího přepólování tak není možné použít libovolně velké napětí, a problém malého zdvihu musíme vyřešit jinak. V praxi používané piezoaktuátory tvoří několik na sebe naskládaných jednotek, což umožňuje násobně větší deformace při stejném napětí (Obr. 6). Použití těchto akčních členů je velmi výhodné z pohledu spotřeby energie, protože pro udržení piezokrystalu v jeho „roztažené“ poloze, není nutné, aby ním neustále procházel proud (piezokrystal se chová jako kondenzátor). Na druhou stranu při oscilačním pohybu se u nich projevuje nezanedbatelná hystereze a je tedy často zapotřebí řízení s uzavřenou smyčkou.



Obr. 6: Sendvičově naskládané piezoaktuátory

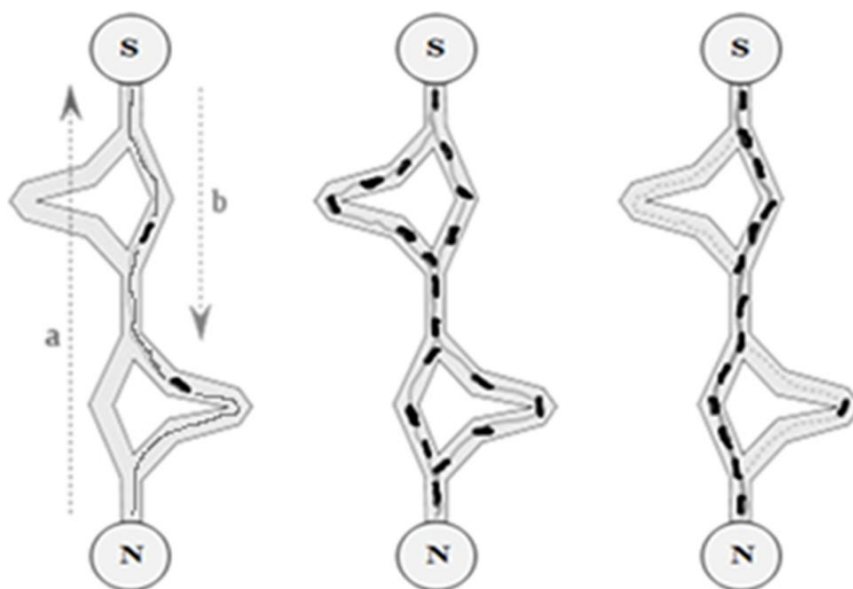
2.3 Senzorika a řízení

Senzory měřící nejrůznější fyzikální veličiny jsou naprosto nezbytnou součástí konstrukce mikrorobotů. Umožňují nám sledovat, co se děje v pracovní oblasti robota, a řídit ho tak, aby správně plnil svoji funkci. Použitelných senzorů pro aplikaci v mikrorobotice existuje celá řada a téměř vždy se jedná o zařízení sledující námi požadovanou fyzikální veličinu a měnící ji na korespondující elektrický signál, který je možné dále zpracovat. Řízení je pak možné provádět analogově nebo digitálně pomocí mikročipů a algoritmů. Po dosažení optimalizace výroby samostatně se pohybujících mikrorobotů na takovou úroveň, že jejich produkce bude levná a rychlá, má potenciál uplatnění algoritmů využívající rojové inteligence.

2.3.1 Rojová inteligence

Rojová inteligence, nazývána někdy také inteligence hejna, je jev pozorovaný u mnoha druhů živočichů, jako jsou ptáci, ryby, mravenci, nebo včely. Je postavena na kooperaci většího počtu jedinců s malou mírou inteligence, kterým však vzájemná spolupráce umožňuje dělat správná rozhodnutí a řešit velice komplexní problémy. Názorným příkladem je hledání nejkratší a nejefektivnější cesty od hnízda ke zdroji potravy u mravenců, kdy nejprve volí cestu náhodně a postupem času pomocí vzájemné komunikace začne drtivá většina jedinců používat tu

neoptimálnější cestu. (Obr. 7). Dalším příkladem je výběr nejlepšího místa pro včelí roj. Včelí společenství musí zvolit jednu z desítek vhodných lokalit. Jejich rozhodnutí zahrnuje velké množství faktorů, jako je dostatek potravy, dostatek vody, ochrana před výkyvy teplot a před proměnami počasí. Optimalizace tohoto typu je velmi složitý problém, nicméně včely s relativně jednoduchým nervovým systémem jej zvládají pomocí rojové inteligence snadno řešit.



Obr. 7: Výběr neoptimálnější cesty mezi zdrojem potravy a hnízdem mravenců. [2]

3 NÁVRH KŘÍDEL A JEJICH POHYBOVÉHO ÚSTROJÍ

Jak je již popsáno výše, výroba mikrorobotů je velice složitá a bez drahého a sofistikovaného vybavení nemožná. Proto jsem konstrukci robota několikanásobně zvětšil s tím, že jsem se snažil uplatňovat stejné myšlenkové postupy a metody, jako by se skutečně jednalo o mikrorobota.

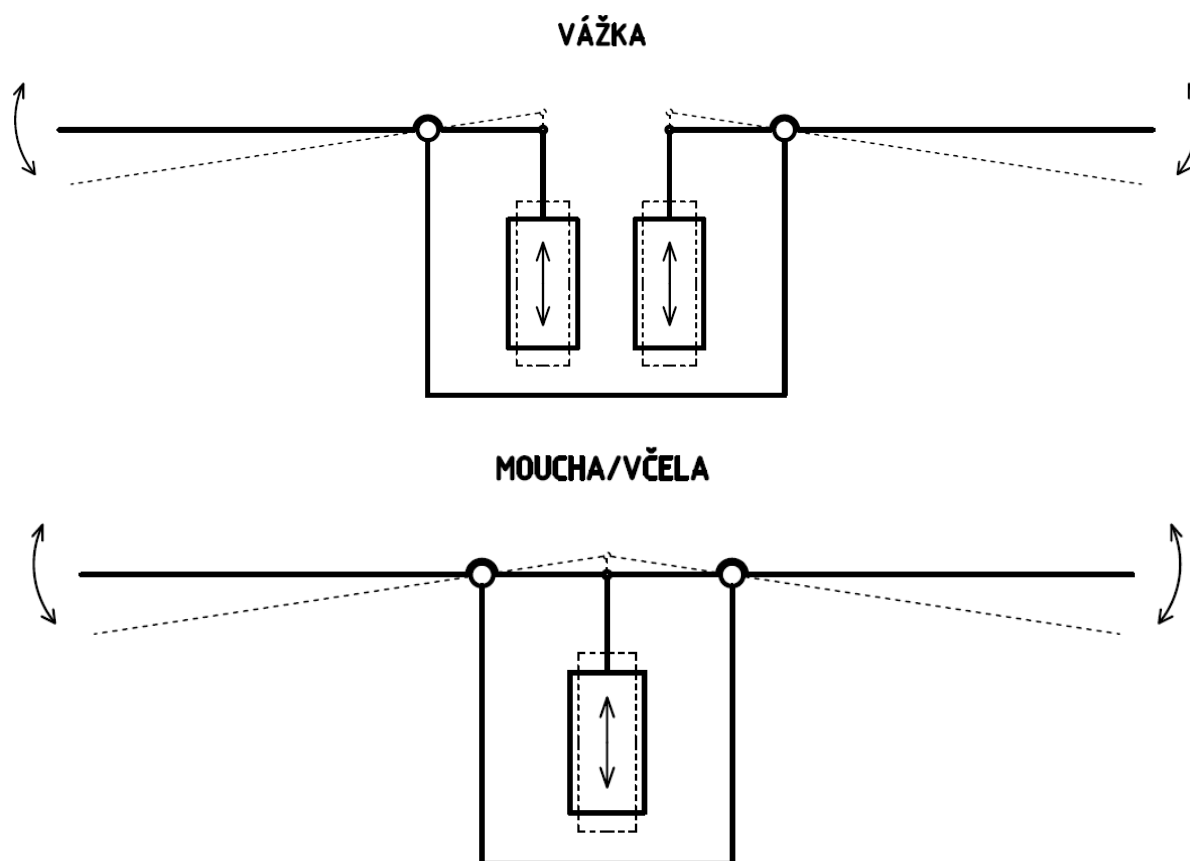
3.1 Návrh křídel

Návrh tvaru křídel je extrémně složitý proces vyžadující velké množství testování a prototypování, a proto je inspirace v živočišné říši velmi užitečným nástrojem, protože evoluce udělala značnou část práce za nás. Již existujících a skvěle fungujících křídel příroda stvořila velmi mnoho, avšak pro použití v mikrorobotice je nejlepší inspirací jednoznačně létavý hmyz. A to hlavně proto, že velikost a hmotnost hmyzu se více méně shoduje s kýženou velikostí a hmotností mikrorobota.

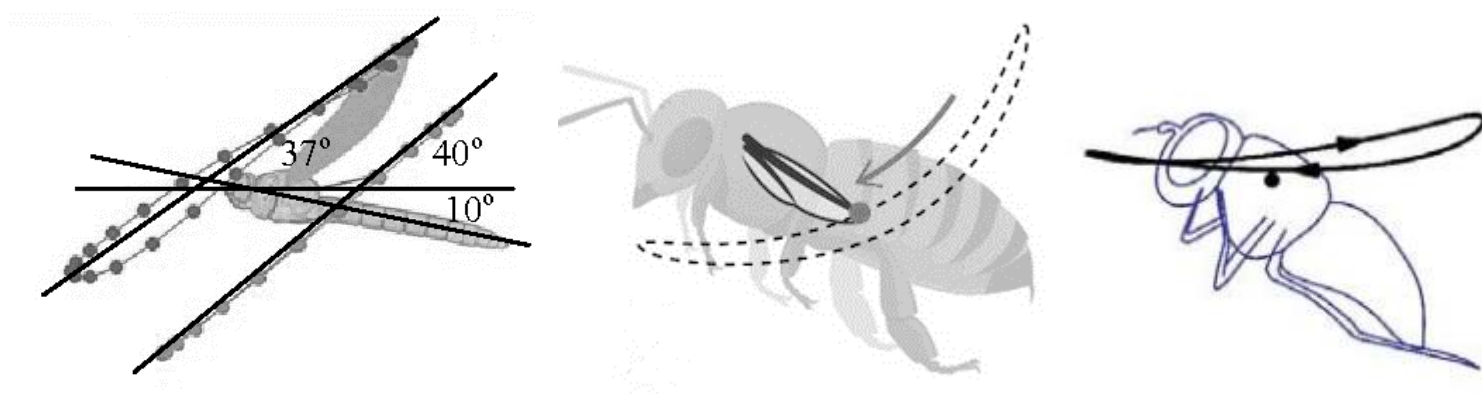
3.1.1 Tvar křídel

Pro výběr vhodného tvaru křídel bylo zúžení výběru na létavý hmyz vhodnou volbou, ovšem stále se nabízí nepřehledné množství variant. Proto jsem zvolil tři kandidáty, které jsem dále analyzoval. Těmito kandidáty byly vážka, včela a moucha. Vážku jsem zvolil jako jednoho z nejlepších letců v hmyzí říši, včelu proto, že by její funkci opylování mohli jednou mikroroboti plnit a mouchu pro její jednoduché, ale přesto velmi efektivní pohybové ústrojí.

Všechny tři typy křídel jsem podrobil důkladné analýze, při níž jsem se zaměřil hlavně na porovnání jejich pohybových ústrojí (Obr. 8) a trajektorie kterou jejich křídla při kmitání opisují (Obr. 9).

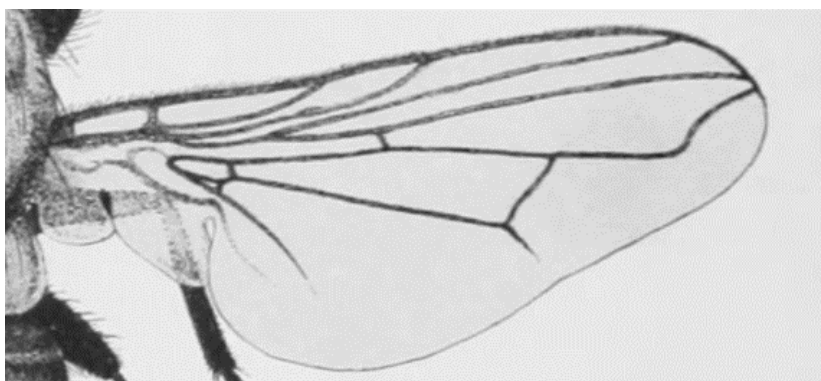


Obr. 8: Porovnání zjednodušených pohybových ústrojí vážky, mouchy a včely



Obr. 9: Porovnání trajektorie koncového bodu křídel včely a mouchy [8], [9], [10]

Vážka má dva páry křídel a každé z nich je ovládáno samostatným svalem. To jí umožňuje měnit směr letu extrémně rychle a efektivně, ale pro svoji složitost je toto řešení pro konstrukci nevhodné. Křídla včely jsou jedny z nejmenších v poměru k velikosti těla, což výrazně zvyšuje frekvenci kmitání, a trajektorie kterou opisují vyžaduje 3 stupně volnosti, čehož nejsem schopen dosáhnout. Pohybové ústrojí mouchy je stejně jako u včely spojené a obě křídla ovládá jeden sval, ale kmity jsou mnohem přímější a křídla větší. Jako předlohu pro návrh křídel jsem tedy zvolil křídla mouchy domácí (Obr. 10).



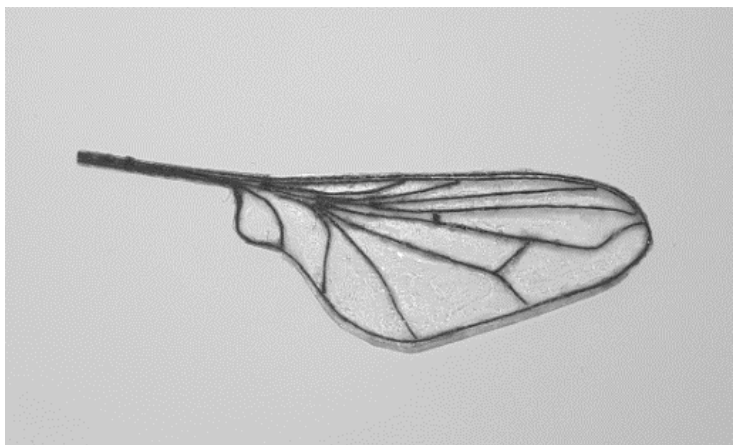
Obr. 10: Křídlo mouchy domácí zvolené jako předloha pro výrobu

3.1.2 Materiál křídel

Křídla hmyzu jsou stejně jako povrch jejich těl tvořena kutikulou, která se vyznačuje vysokou pevností a houževnatostí. Její vlastnosti se mohou na různých místech těla hmyzu lišit. U křídel převažuje pevnost a jelikož jsou několikanásobně tenčí než lidský vlas, hrozí při namáhání vznik trhlin nebo kompletní ulomení křídel. To je vyřešeno hustým protkáním křídel žilkami a příčkami, které se chovají jako výztuha křídel dodávající potřebnou houževnatost a slouží také případně jako bariéra pro vzniklé trhliny [4].

Vzhledem k nemožnosti replikovat skutečný materiál hmyzích křídel byly v minulosti na Wyssově institutu (*Wyss Institute for Biologically Inspired Engineering*) k jejich výrobě použity kompozity vyztužené karbonovými vlákny [5]. Protože tato výroba je náročná, nákladná a hlavně nedostupná, tak jsem pro výrobu volil metodu inspirovanou jak přístupem přírody, tak výzkumem Wyssova institutu za použití dostupných materiálů a technologií. Prohodil jsem vlastnosti materiálů výplně a výztuhy křídel (stejně jako to udělali ve Wyssově instutu) – zvolil jsem tedy pevnou a křehkou kostra výztuhy a houževnatou výplň. Tvar kostry jsem převzal ze skutečných křídel mouchy domácí s malými úpravami pro větší tuhost křídla. Výztuhu jsem vyrobil z bavlněných vláken, které jsem mohl vytvarovat do potřebného tvaru a následně jsem je napustil kyanoakrylátovým lepidlem k dodání potřebné pevnosti a fixaci tvaru.

Tu jsem stejným lepidlem přilepil k polypropylenové fólii vyplňující mezery v kostře. Ke křídům jsem při výrobě připojil „stopku“ pro připojení k převodovce (Obr. 11).



Obr. 11: Křídlo se stopkou

Zvolený postup a použité materiály jsou výsledkem několika pokusů, při kterých jsem experimentoval s různými lepidly (vyrobená kostra za použití nesprávného lepidla neměla dostatečnou tuhost, nebo lepidlo nebylo schopné penetrovat vlákno do hloubky), metodami tvarování výztuhy a s různými možnostmi vyplnění mezer v kostře pro dosažení funkční plochy křídel (pokusy o vyplnění mezer ztuhlým lepidlem vedly k příliš křehké konstrukci, nebo nebylo možné křídlo bez porušení oddělit od podložky na které bylo vyrobeno).

3.2 Návrh Pohybového ústrojí

Návrh pohybového ústrojí se v největší míře odvíjel od volby akčního členu. Použití jednoho z aktuátorů popsaných v kapitole 2.2. nemá v případě několikanásobně zvětšeného modelu smysl kvůli příliš malým zdvihům a naprostému nepoměru velikosti k ostatním dílům. Dalším důvodem pro použití jiného zdroje pohybu byla opět cena a nedostupnost v praxi používaných zařízení. Další podmínkou při návrhu bylo zajištění správného pohybu křídel se dvěma stupni volnosti.

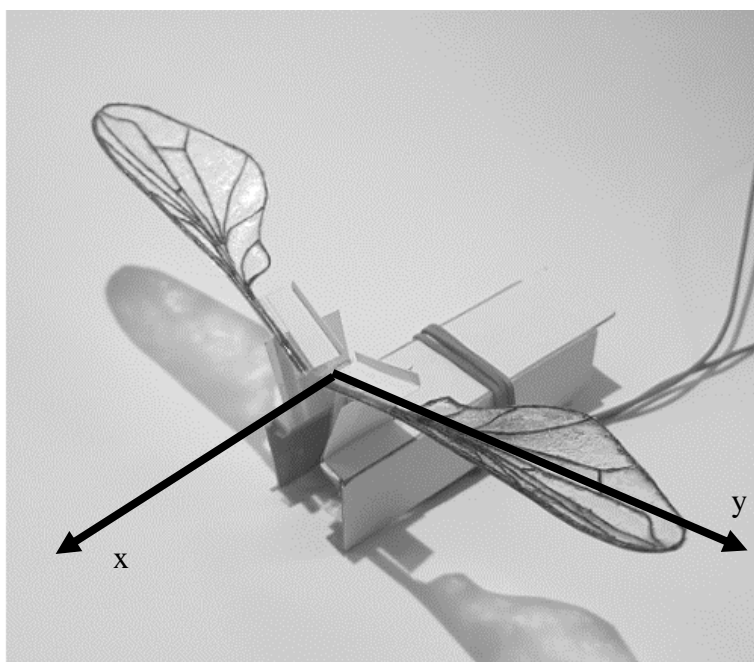
3.2.1 Výběr akčního členu

Pro aplikaci kmitání křídel se již v minulosti pro svoji schopnost pracovat velmi rychle a dosáhnout tak potřebných frekvencí osvědčily piezoaktuátory. Jako kompromis mezi dostupností a snahou se co nejvíce se přiblížit mechanismům používaných v mikrorobotice jsem použil jako zdroj pohybu malý DC kartáčový motor typu RM1A. Jsem si vědom toho, že použití rotačních motorů pro mikrorobty s jakýmkoliv vnitřním vinutím je v podstatě nemožné,

proto jsem se pomocí kliky snažil převést rotační pohyb motoru na pohyb translační za účelem co nejvěrnějšího napodobení pohybu jinak použitého piezoaktuátoru. Takto upravený motor má však oproti akčním členům z piezokrystalů značné nedostatky v možnostech řízení a pohybu, které jsou v dalších podkapitolách rozvedeny.

3.2.2 Kinematický mechanismus

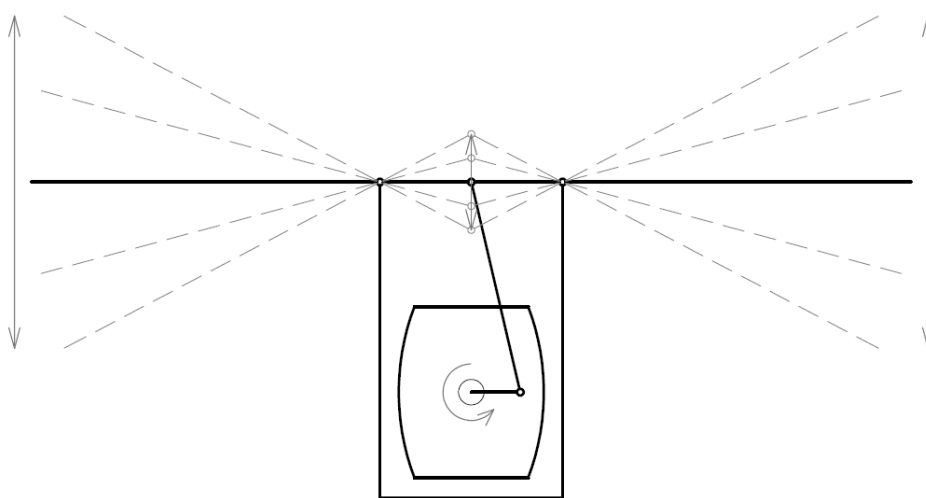
Kmitavý pohyb křídel mouchy domácí je velice složitý pohyb se třemi stupni volnosti, jehož všechny aspekty nejsou doposud prozkoumány. Hmyz disponuje svaly, které jsou schopné natáčet křídla kolem všech tří os s neuvěřitelnou přesností a rychlostí, což jim umožňuje dokonalý let. Vzhledem ke komplexnosti tohoto pohybu jsem se omezil jen na pohyb největších a nejnamáhanějších svalů hmyzu odpovědných za samotné kmitání. To však znamenalo zredukovat stupně volnosti pouze na jeden, což je ale nepřípustné, protože by to znamenalo nemožnost letu a jakékoli kontroly. Jediným způsobem, jak dosáhnout letu a aspoň omezeného řízení, bylo tedy ponechat možnost natáčení křídel i kolem druhé osy, označené na obrázku písmenem y (Obr. 12). Tohle natáčení je pohybem pasivním – tedy bez vazby na akční člen který by ho bezprostředně řídil. Funguje na základě odporu vzduchu kmitajících křídel a velikost natočení je možné korigovat rychlostí s jakou křídlo kmitá. Takového řešení využili při konstrukci i ve výzkumném centru Wyssova institutu [5]. Jak se pak později ukázalo využívá této metody i hmyz a otáčení křídel podél této osy pomocí svalů uplatňuje, jen když je to nutné.



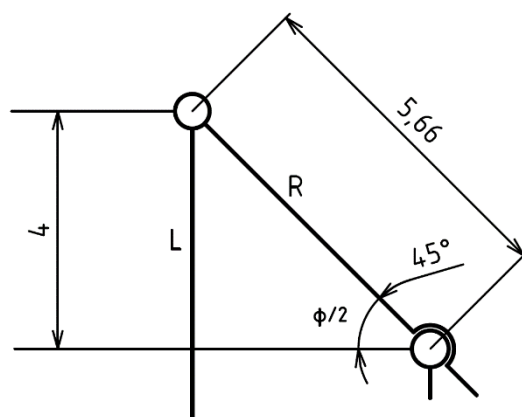
Obr. 12: Pasivní vazba umožňující natáčení křídla kolem osy y

Kinematický mechanismus jsem se tedy snažil navrhnout co nejjednodušší, s co nejmenším počtem členů a za použití co nejmenšího množství materiálu. Výsledkem je mechanismus sloužící jak pro převod translačního pohybu na rotační, tak pro zvětšení zdvihu (Obr. 13). Běžné provedení rotačních vazeb, pomocí čepů či hřídelí společně s kluznými nebo valivými ložisky, nepřipadá u mikrorobotů v úvahu. Proto je nutné využití ohebných kloubů. Ty je možné realizovat použitím pružného materiálu, avšak použití takových kloubů znemožňuje rotaci o 360°. Použití běžného DC motoru společně s klikovým mechanismem nevyhnutelně vyžaduje použití rotační vazby konající pohyb kolem dokola, ale protože se jedná pouze o model, ponechal jsem tuto vazbu jako součást náhrady za piezoaktuátor a je provedena jako čep v díře. Ostatní vazby využívají elasticity tenké vrstvy polypropylenu. Další negativní důsledek plynoucí z nahrazení akčního členu z piezokeramického materiálu rotačním DC motorem, je fixní výchylka křídel při kmitání, což se neshoduje s funkcí pohybového ústrojí hmyzu, který je schopen tuto výchylku měnit dle potřeby (hlavně při vzletání nebo změně rychlosti letu). Bylo proto nutné zvolit úhel kmitů ϕ , který se liší nejen u každého druhu hmyzu, ale nepatrně i u každého jedince. Ten jsem nastavil jako hodnotu pro hmyz běžnou a bez problémů dosažitelnou a pro můj model proveditelnou na 90°. Výchylka ϕ je funkcí délky kliky L a délky ramene R (Obr. 14). Kliku jsem vyrobil o délce 4 mm, což umožňuje pomocí vztahu (3) snadno zjistit nutnou délku ramene R . Délku ramene jsem počítal v horní úvratí, aby bylo možné kompenzovat roztažení celé kostry při pohybu ojnice směrem dolů.

$$\sin\left(\frac{\phi}{2}\right) = \frac{L}{R} \rightarrow R = \frac{L}{\sin\left(\frac{\phi}{2}\right)} = \frac{4}{\sin\left(\frac{90^\circ}{2}\right)} = 4 \cdot \sqrt{2} \cong 5.66 \text{ mm} \quad (3)$$



Obr. 13: Navržené kinematické ústrojí



Obr. 14: Výpočtový trojúhelník

Materiál pro výrobu kostry a kinematického ústrojí samostatně se pohybujících, a zejména létajících, mikrorobotů musí být hlavně lehký, ale také dostatečně pevný a použitelný pro výrobu. Jelikož se v mém případě jedná pouze o zvětšený model, nebylo nutné dosáhnout tak vysoké přesnosti při výrobě, a nemusela být tudíž využita v praxi používaná metoda obrábění jednotlivých vrstev laserem a jejich následné spojení [5]. Při výrobě jsem použil jako stavební materiál papír (druhou alternativou pro výrobu jednotlivých dílů byl 3D tisk z plastových materiálů, toho jsem nevyužil hlavně pro nedostatek zkušeností s touto metodou a kvůli omezenému přístupu k tiskárnám). Potřebné tuhosti konstrukce jsem dosáhl vrstvením materiálu nebo pomocí žeber. Veškeré spoje byly realizovány pomocí lepidla. Řešení rotačních vazeb pomocí malého kousku polypropylenové folie vzešlo z testování několika různých materiálů. Testování funkčnosti těchto vazeb však probíhalo jen v místech kinematického řetězce, který zajišťuje samotné kmitání. Stejnou vazbu jsem použil i pro zajištění možnosti otáčení kolem druhé osy. Správnost fungování tohoto členu však nejsem schopen zajistit, protože její fungování vyžaduje poměrně vysokou rychlost kmitání (je nutné dosáhnout určitého odporu okolního vzduchu). Nejsem tak bez pomoci vysokorychlostní kamery nebo jiné pozorovací aparatury schopen rozlišit a optimalizovat pohyb kolem zmíněné vazby.

3.2.3 Možnosti řízení pohybu

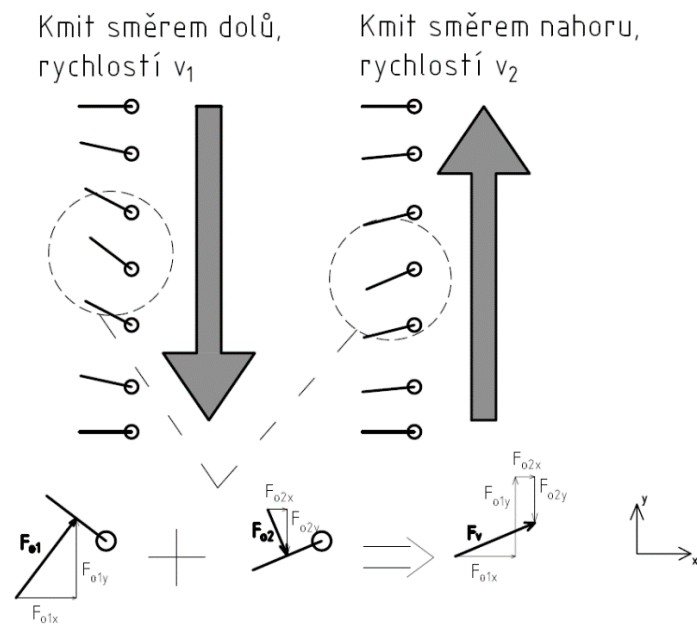
Mechanismus letu hmyzu není doposud přes veškeré snahy a roky výzkumů úplně dopodrobna objasněn. Základní metody pohybu křídel a jejich funkce jsou již popsány velmi detailně. Informace, které stále chybí, souvisí s vnitřní svalovou strukturou a zejména pak s nervovou soustavou. Zdroje impulsů regulující a řídící pohyb křídel, jejich vedení a následný mechanismus vykonání požadovaného pohybu takovou rychlostí, jakou je toho hmyz schopen,

zůstávají stále často pouze ve stavu hypotéz [6]. To do jisté míry omezilo možnosti inspirace u žijících jedinců.

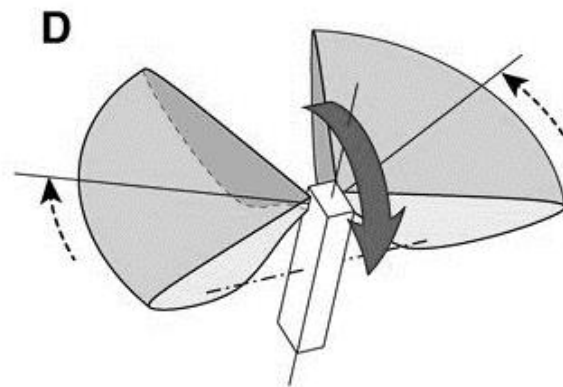
Protože zvětšený model má nahrazený piezoaktuátor rotačním DC motorem, není schopen unést vlastní váhu a možnosti pohybu křídel jsou značně omezeny, navrhoval jsem možnosti řízení jen teoreticky na základě známých informací o metodách používaných hmyzem a také na základě zkušeností Wyssova institutu s tímto problémem. Samotný let hmyzu je velice nestabilní a jakákoliv malá výchylka (ať už změna prostředí nebo nedokonale provedený pohyb) může vyvést robota z rovnováhy a způsobit jeho nekontrolovatelný pád. Kmitání křídel hmyzu se může bez problému pohybovat v rozmezí 100–200Hz a každý kmit má na svědomí značně netriviální změny v proudění vzduchu kolem křídel, tudíž jsou za potřebí velmi rychlé senzory a pohotová odezva. Komplexnost proudění vytvořené pohybem křídel je velmi obtížné simulovat v simulačních programech, a proto se v praxi využívá jen jako orientační. Hlavním zdrojem informací tak zůstává testování prototypů s jemnými změnami (tvar křídel, frekvence nebo tuhost kloubů, které zajišťují rotační pohyb apod.) v laboratořích.

První možností řízení je změna výšky letu. Té je možné dosáhnout dvěma způsoby. Tím prvním jsou rozdílné rychlosti při opačných směrech kmitání (toho je teoreticky možné dosáhnout i s DC motorem použitým v modelu, avšak pouze při nízkých rychlostech). Jak je vidět ze silového řetězce (Obr. 15) směřuje výsledná síla směrem nahoru. To je způsobeno větším odporem vzduchu spolu s rozdílným naklopením křídel kolem své pasivní osy. Stejného výsledku lze dosáhnout upravením této vazby tak, aby při působení stejných sil bylo natočení jiné. Možností optimalizace je několik (například využití materiálu s nelineární charakteristikou deformace) avšak není možná bez laboratorního testování. Druhým způsobem je naklopení celého mikrorobota požadovaným směrem změnou úhlu kmitání a posunutí výsledné síly mimo těžiště, vytvářející tak moment schopný mikrorobota otočit (Obr. 16) [5].

$$v_1 > v_2$$



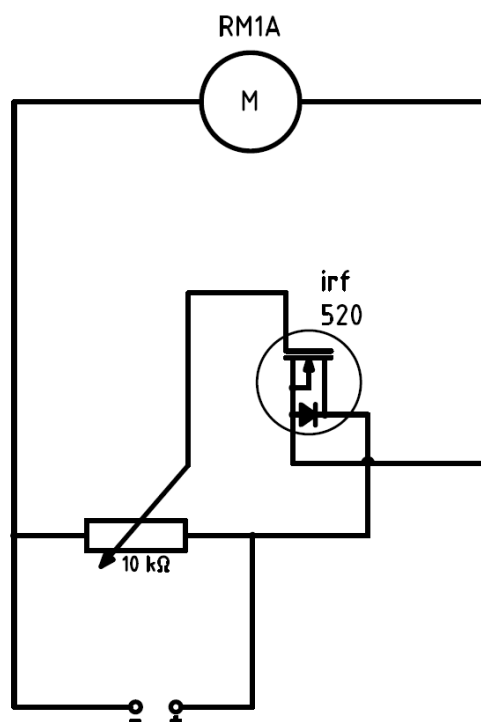
Obr. 15: Síla způsobená rozdílnou rychlostí kmitů



Obr. 16: Otáčení robota za pomoci změny úhlu kmitání [5]

Otáčení robota směrem doleva nebo doprava vyžaduje možnost „rozpojení“ křídel a pohánění jen jednoho z nich (jak bylo pozorováno u letu mouchy [6]), nebo použití dvou akčních členů každý pro pohon jednoho křídla. To kromě dobře regulovatelného zatáčení umožňuje použít různé výšky zdvihu piezoaktuátorů, čímž se dosáhne rotace kolem podélné osy mikrorobota.

Jako zdroj elektrické energie pro pohon jsem použil tužkové baterie poskládané do série s výstupním napětím 6 V. Toto napětí je pak možné pomocí elektrického obvodu s potenciometrem a tranzistorem typu irf520 dle potřeby měnit (Obr. 17). Napájení samostatně se pohybujících mikrorobotů je stále jedním z největších problémů, jelikož nejsou k dispozici zdroje s dostatečnou kapacitou v tak malých rozměrech a s tak malou hmotností jaké jsou třeba. Při výzkumu ve Wyssově institutu byl použit externí zdroj připojený k pohonu robota malým drátkem neovlivňující charakter letu.



Obr. 17: Schéma obvodu

Samotnému řízení jsem se kvůli důvodům popsaným výše (nahrazení akčního členu, skutečnost že se jedná jen o model neschopný letu) věnoval jen teoreticky. Hlavní překážkou při návrhu řídicí jednotky je opět její hmotnost a velikost (tým Wyssova institutu používá pro řízení, stejně jako pro zdroj energie, externí řídicí jednotku). Inspiraci pro řešení tohoto problému jsem se opět snažil najít u žijících zástupců létavého hmyzu. Pozornost jsem tentokrát zaměřil nikoliv na mouchu, ale na vážku. Schopnost vzletět pozpátku ze svislé polohy, nebo za

letu ulovit jiný kolem letící hmyz dělá z vážky jednoho z nejobratnějších letců, a tedy i ideálního kandidáta pro inspiraci při návrhu. Jejich úspěch pramení z efektivity nervové soustavy. Nervové kanálky vedou od receptorů přímo do svalů [7]. To znamená absenci jakékoliv nutnosti „přemýšlení“ a umožňuje okamžitou odezvu na nervový vzruch. Tomu by v robotice mohlo nejlépe odpovídat analogové řízení, které by mohlo odstranit nutnost použití složitých logických obvodů. Použití této metody v praxi se může setkat s problémem optimalizace, na kterou měli vážky za svou dobu vývoje a existence několik miliónů let, vzhledem ke stále omezeným možnostem výroby mikrorobotů a jejich testování. Dalším potenciálním nedostatkem imitace metody řízení vážek (nebo v podstatě jakéhokoliv létavého hmyzu) jsou možnosti senzorů které máme k dispozici. Oko vážky je složeno z několika desítek tisíc fotoreceptorů [7]. To jí umožňuje sledovat kořist a upravovat směr letu neuvěřitelnou rychlostí. Ačkoliv člověk není zatím schopen vyrobit senzor takové kvality a propracovanosti, jako jsou právě oči hmyzu, stojí určitě za to se analogovému řízení věnovat a dále se snažit o jeho integraci do mikrorobotů, jelikož jedna ze základních úloh létajícího mikrorobota, který by měl zastat práci včel, je přistání na větrem rozkmitaném květu rostliny.

V rámci šetření místem a energií není vhodné do mikrorobotů instalovat výkonné vysílače a přijímače signálů, které by nám umožňovaly roboty vzdáleně řídit, proto je u nich požadována vysoká míra autonomie. S tou by mohly významně pomoci metody pracující s rojovou inteligencí. Uplatnění těchto metod má právě v mikrorobotice velký potenciál, protože, jak je již výše popsáno, ve snaze vyrobit každého robota co nejmenšího a nejjednoduššího nám dávají mikroroboti možnost použít jich velké množství a pomocí rojové inteligence je propojit a dát jim schopnost řešit výrazně složitější problémy, než jakých by byl pouze jeden mikrorobot schopen. Použití této metody je však stále spíše v oblasti sci-fi, protože v současné době je jejich výroba nákladná (použití tisíců až sta tisíců kusů nepřipadá v úvahu) a vývoj není ani zdaleka u konce.

4 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

Návrh mikrorobotů je multidisciplinární problém zahrnující velmi široké spektrum vědních oborů. Já jsem se zabýval návrhem křídel a kinematického ústrojí zajišťující jejich kmitání. Významnou pomocí při mém návrhu byla inspirace u žijících organismů, u kterých se o optimalizaci a testování všech použitých metod postarala evoluce. Bohužel pro náročnost výroby a nutnosti specifického vybavení pro výrobu robotů s mikro rozměry bylo nutné přistoupit k celé řadě kompromisů a zjednodušení. Mezi ty nejvýznamnější patří určitě celková velikost modelu, který má rozměry v centimetrech nikoli v milimetrech (při maximálním rozpětí je to 16 cm, na délku má 5 cm. Dalším je nahrazení piezoaktuátorů z důvodu jejich ceny a nepoužitelnosti ve zvětšeném modelu rotačním DC motorem a v neposlední řadě napájení a ovládání robota z externích zdrojů. I když zvětšený model umožňoval použití běžně použitelných metod při návrhu robotů, snažil jsem se co nejvíce držet způsobů konstrukce používaných v mikrorobotice. Výsledkem je model, který je schopen požadovaného kmitavého pohybu. Snaha co nejvíce se přiblížit mechanismu fungování u hmyzu vedla ke spoustě nepodařených pokusů o výrobu jednotlivých součástí mého modelu, což zabralo výrazně více času, než jsem očekával. Z tohoto důvodu jsem se již nemohl věnovat prakticky senzorům a metodám řízení tak, jak bych si přál. Navíc se domnívám, že testování těchto systémů by vyžadovalo skutečně létající model.

Další nedostatek, který jsem si před začátkem práce neuvědomil, je v podstatě nemožnost ověření výkonu a funkčnosti mnou navrženého mechanismu. V praxi používané metody sledování modelu vysokorychlostními kamerami jsem neměl k dispozici, a proto mi zbylo jen posouzení pohybu vlastním okem. To způsobilo omezené možnosti při výběru materiálu pro kloubové vazby, jejichž tuhost jsem neměl jak určit.

Ve výsledku si myslím že jsem získal cenné zkušenosti a seznámil jsem se se způsoby a materiály (ať už prakticky, nebo jen teoreticky) používanými při návrhu mikrorobotů, které by mi měly pomoci v budoucnu při práci a návrhu s potřebným vybavením a bez veškerých kompromisů.

5 ZÁVĚR

Využití mikrorobotů jako opylovačů zemědělských a užitkových plodin a stromů, jež jsem se snažil akcentovat v celé práci, vzniklo na základě stále se nezlepšující hrozby hromadného vymírání včelstev v důsledku změn klimatických podmínek na zemi. Ačkoliv se nejedná o situaci, která by měla nastat během několika málo let, závisí na opylení veškerá zemědělská produkce lidstva, a proto si myslím, že je nezbytně nutné i v této oblasti hledat možná řešení dostatečně s předstihem. Proto jsem se zabýval právě létajícími mikroroboty a snažil jsem se vlastním návrhem pochopit využitelné metody. Takto nabyté zkušenosti mohou být využity pro další výzkum v oboru mikrorobotiky, a to nejen v oblasti samostatně se pohybujících létajících robotů. Využití mikrorobotů v praxi není ještě stále běžnou záležitostí, ale v oborech, kde již své místo našli, umožnili značný posun vpřed (atomová mikroskopie, lékařství).

Další důležitou složkou této práce byla inspirace u živých organismů a implementace metod pohybu, které využívají, nebo typy materiálů, které tvoří jejich těla, do návrhu. Využití přírodou ověřených mechanismů je relativně nový, ale pomocí čím dál více se zlepšujících metod pozorování a analýzy rychle se rozvíjející způsob designu robotů a v oblasti mikrorobotiky umožňuje významně zkrátit dobu testování a prototypování jednotlivých částí konstrukce. Proto je nyní výzkum a vývoj mikrorobotiky velmi perspektivním oborem a společně se zlepšujícími se metodami výroby a integrace mechanismů inspirovaných anatomii živočichů míří k vytyčeným cílům, jako je například schopnost mikrorobotů samoreplikace, jež by mohla být významným milníkem při osidlování cizích planet.

6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Bellouard, Yves. *Microrobotics: methods and applications*. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2010. ISBN 978-1-4200-6195-6
- [2] Ab Wahab MN, Nefti-Meziani S, Atyabi A. A Comprehensive Review of Swarm Optimization Algorithms. *PLOS One* 10(5): e0122827. [cit. 2021-05-20] Dostupné z: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122827>
- [3] Hewitt, C. Gordon. *The house-fly, Musca domestica Linn. : its structure, habits, development, relation to disease and control*. Cambridge: University Press, 1914.
- [4] Trinity College Dublin. *Transparent, thin and tough: Why don't insect wings break?* ScienceDaily. ScienceDaily, 22 August 2012. [cit. 2021-05-20] Dostupné z: www.sciencedaily.com/releases/2012/08/120822181255.htm
- [5] Kevin Y. Ma, Pakpong Chirarattananon, Sawyer B. Fuller, Robert J. Controlled Flight of a Biologically Inspired, Insect-Scale Robot. *Science*, 03 May 2013: Vol. 340, Is. 6132, s. 603–607
- [6] Tanvi Deora, Amit Kumar Singh, and Sanjay P. Sane. Wing and haltere coordination in flies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Jan 2015, 201412279. [cit. 2021-05-20] Dostupné z: <https://www.pnas.org/content/early/2015/01/14/1412279112>
- [7] Paloma T. Gonzalez-Bellido, Hanchuan Peng, Jinzhu Yang, Apostolos P. Georgopoulos, Robert M. Olberg. Directional population vector code in a dragonfly. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Jan 2013, 110 (2) 696-701. [cit. 2021-05-20] Dostupné z: <https://www.pnas.org/content/110/2/696>
- [8] Christopher M. Jernigan. "How Do Bees Fly?". *ASU – Ask A Biologist*, 24 October, 2017. [cit. 2021-05-20] Dostupné z: <https://askabiologist.asu.edu/how-do-bees-fly>
- [9] Lyu, Yu & Zhu, Haojie & Sun, Mao. *Flapping-pattern change in small and very small insects*. 2018.
- [10] Dong, H. and Z. Liang. *Effects of Ipsilateral Wing-Wing Interactions on Aerodynamic Performance of Flapping Wings*. 2010.